

УДК 621.3

doi: 10.20998/2413-4295.2020.02.03

ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИЙ ДВИГУН З ПОКРАЩЕНИМИ ТЯГОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М. О. ЛУК'ЯНОВ

кафедра електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА
e-mail: zebrahead097@gmail.com

АНОТАЦІЯ Вентильно-індукторний двигун завдяки своїм перевагам може використовуватися у транспортних засобах низької та середньої потужності. Проте, через значні пульсації обертового моменту, складність електричного драйвера й недостатню питому потужність він не є розповсюдженим. У даній статті розглядається структура і характеристики вентильно-індукторного двигуна з С-подібними полюсами і електричний драйвер для його контролю для мінімізації недоліків двигуна. В результаті аналізу, запропоновано критерій ефективності, який базується на порівнянні прискорюючої і гальмівної сили, що створюється полюсом статора. Для забезпечення ефективної роботи двигуна гальмівна сила повинна бути мінімальною, а її вплив компенсовано певною формою струму, за рахунок чого сумарна сила і момент залишаються постійними в кожен момент часу. За рахунок вибору оптимального відношення між полюсами статора й ротора забезпечується мінімальне значення гальмівної сили, а вибір оптимальної кількості полюсів дозволяє досягти максимальної сили. За рахунок високочастотного методу формування струму обмотки статора із запропонованою формою, вплив гальмівної сили і, відповідно, пульсації обертового моменту мінімізовано. При цьому, для підвищення ефективності роботи двигуна запропоновано двоохсекційну структуру полюсів із використанням додаткових обмоток для модуляції амплітуди струму, що додатково дозволяє розподілити потужність між секціями. Формування струму керування обмотками здійснюється розповсюдженим резонансним перетворювачем з м'яким перемиканням ключів. Модульна структура електричного драйвера дозволяє використовувати лише чотири резонансні перетворювачі для всього драйвера при одночасній роботі одного полюса статора. У результаті було виявлено, що оптимальною структурою двигуна є $n+1/n$, так як розміщення полюсів у корпусі ротора дає можливість досягти максимальної сили. Розрахунок вентильно-індукторного двигуна для даної структури й $n=7$ показав зменшення об'єму двигуна в 2,75 разів і підвищення потужності в 6 разів у порівнянні з популярним тяговим асинхронним двигуном. Моделювання електричного драйвера в середовищі Matlab Simulink показало, що пульсації обертового моменту при даному методі формування струму обмотки статора складають близько 3,25% і можуть варіюватись в залежності від кількості періодів модулюючого сигналу.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун; модульний електричний драйвер; постійний момент; високочастотне керування; резонансний перетворювач.

SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR WITH IMPROVED TRACTION CHARACTERISTICS

M. LUKIANOV

Department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Due to its advantages, the switched-reluctance motor can be used in low and medium power vehicles. However, due to the significant torque ripples, the complexity of the electric driver and the insufficient power density, it is not common. This article discusses the structure and characteristics of a switched-reluctance motor with C-shaped poles and an electric driver to control it to minimize the shortcomings of the motor. As a result of the analysis, the criterion of efficiency which is based on comparison of the accelerating and braking force created by a stator pole is offered. To ensure efficient operation of the motor, the braking force must be minimal, and its influence is compensated by a certain form of current, due to which the total force and torque remain constant at all times. Due to the choice of the optimal ratio between the poles of the stator and the rotor, the minimum value of the braking force is provided, and the choice of the optimal number of poles allows achieving the maximum force. Due to the high-frequency method of forming the stator winding current with the proposed shape, the effect of braking force and, accordingly, the torque ripple is minimized. In this case, to increase the efficiency of the motor, a two-section pole structure is proposed using additional windings to modulate the current amplitude, which additionally allows distributing power between sections. The winding control current is generated by a common resonant converter with soft key switching. The modular structure of the electric driver allows using only four resonant converters for all drivers at simultaneous work of one pole of the stator. As a result, it was found that the optimal structure of the motor is $n+1/n$, as the arrangement of the poles in the rotor housing makes it possible to achieve maximum power. The calculation of switched-reluctance motor for this structure and $n=7$ showed a reduction in engine volume of 2.75 times and an increase in power of 6 times compared to the popular traction asynchronous motor. Simulation of the electric driver in the Matlab Simulink environment showed that the torque ripple with this method of forming the stator winding current is about 3.25% and can vary depending on the number of periods of the modulating signal.

Keywords: switched-reluctance motor; modular electric driver; constant moment; high frequency control; resonant converter.

Вступ

На даний час у електричних транспортних засобах популярності набули асинхронні двигуни, а

також двигуни з постійними магнітами через їх відносно просту конструкцію, високий обертовий момент і стабільність роботи [1,2]. Проте, через

складність драйвера асинхронних двигунів і зростання цін на неодимові магніти, актуальним є пошук альтернативних двигунів із дешевших матеріалів і з простішою системою керування [3,4]. Однією з перспективних альтернатив є вентильно-індукторний двигун (ВІД), який може бути сконструйований із феритових осердь або електротехнічної сталі [5,6]. Незважаючи на просту конструкцію, низьку виробничу вартість, високі динамічні характеристики, простий розподіл потужності між секціями двигуна, високу експлуатаційну надійність, він широко не використовується через значні пульсації обертового моменту, недостатній обертовий момент і малу щільність потужності [7].

Стаття розглядає розробку структури вентильно-індукторного двигуна та його драйвера для забезпечення мінімальних пульсацій обертового моменту і покращенню масогабаритних показників.

Мета роботи

У роботі пропонується структура вентильно-індукторного двигуна із С-подібними полюсами ротора й статора з покращеними масогабаритними показниками. Описується форма струму обмоток для забезпечення постійного обертового моменту, а також методика формування заданого струму для забезпечення мінімальних пульсацій.

На основі порівняння характеристик розроблюваного двигуна з популярним асинхронним двигуном ДТА-1У, а також моделюванням перетворювача показуються переваги розробленого двигуна.

Опис вентильно-індукторного двигуна

Найпопулярнішою на даний момент є структура ВІД, зображена на рис. 1(а). Статор і ротор виконані із м'якого магнітного матеріалу, з розташованими по колу полюсами у вигляді зубців. Недоліком такої структури є використання статора й ротора у вигляді суцільного кільцевого сердечника, що призводить до значних втрат на перемагнічення у магнітному контурі, а також великої питомої маси на одиницю потужності.

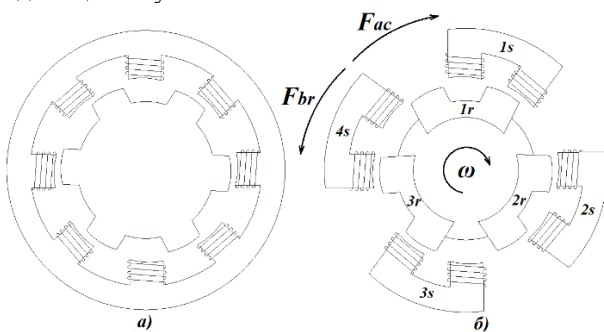


Рис. 1 – Загальна структура ВІД

На рис. 1(б) зображено запропоновану структуру ВІД, полюси ротора й статора якого мають С-подібну форму з зубцями. Це дозволяє зменшити довжину магнітного контуру і в результаті зменшити втрати, використання магнітного матеріалу, а також покращити масогабаритні показники [8].

Загалом, ВІД складається з n полюсів ротора й k полюсів статора. Кожен полюс статора містить обмотку, яка індукуює магнітний потік, що приводить в рух ротор в певному напрямку з деякою кутовою частотою ω й обертовим моментом M , що визначається силою прискорення F_{ac} . Обмотка для індукції магнітного поля, залежить від відносного розташування полюсів статора і ротора. Для структури, показаної на Рис. 1(б), обмотка на полюсі статора $1s$ підходить для індукції магнітного поля за рахунок найкоротшої відстані до полюса ротора $1r$ у напрямку руху. В результаті магнітного потоку, що індукуюється в магнітному ланцюзі, створеному цими двома полюсами, з'являється прискорююча сила F_{ac} . Ключовим є те, що магнітний потік полюса $1s$ одночасно створює гальмівну силу F_{br} з полюсом ротора $2r$. Тому сумарна сила F_{Σ} – це сума всіх прискорювальних і гальмівних сил. Але на практиці враховуються лише сили, створені двома найближчими полюсами ротора:

$$F_{\Sigma} = F_{ac} - F_{br}, \quad (1)$$

де сили F_{ac} і F_{br} обчислюються однаково:

$$F = \frac{1}{2\mu_0 S_g} \cdot \left(\frac{IL}{N} \right)^2, \quad (2)$$

де S_g – площа зазору, I – струм обмотки, N – кількість витків обмотки, L – індуктивність обмотки:

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S_g \mu}{l_{mag} + l_g \mu}, \quad (3)$$

де l_{mag} – довжина магнітної лінії, l_g – довжина зазору.

Загальний обертовий момент T_{Σ} , обчислюється як добуток загальної сили і радіуса ротора R :

$$T_{\Sigma} = F_{\Sigma} R, \quad (4)$$

Загальний обертовий момент T_{Σ} забезпечується сумарним струмом обмотки I_{Σ} полюса статора:

$$I_{\Sigma} = I_{ac} + I_{br} + I_{leak}, \quad (5)$$

де I_{ac} – струм, що створює силу F_{ac} ; I_{br} – струм, що створює силу F_{br} ; I_{leak} – струм потоку розсіювання.

Структура ВІД та його алгоритм управління повинні бути розроблені таким чином, щоб забезпечити регулювання обертового моменту з мінімальними пульсаціями та мінімальним загальним струмом I_{Σ} , наскільки це можливо.

Вибір оптимальної структури двигуна

Забезпечити високу ефективність роботи ВІД, мінімальні пульсації моменту й мінімальний сумарний струм можливо, коли гальмівна сила F_{br} прямує до нуля, тобто коли робочий полюс статора поблизу робочого полюса ротора. Така умова повинна досягатися постійно під час обертання ротора. Конфігурація ВІД при цьому відіграє вирішальну роль. Були проаналізовані комбінації $(n+1)/n$, $(2n+1)/n$, $(2n+2)/n$, де у чисельнику – кількість полюсів статора, а в знаменнику – статора, n – ціле число. Після аналізу вказаних структур, було виявлено, що ефективність роботи ВІД – $k_{ef}=1-F_{br}/F_{ac}$, що визначається відношенням гальмівної сили до прискорюючої, найкраща у конфігурації $2n+1/n$. Однак, структура $n+1/n$ має найкращу щільність розміщення полюсів на роторі відносно полюсів статора і дозволяє забезпечити найбільшу силу, тому її найкраще використовувати на практиці.

При цьому, при використанні лише одного полюса ротора одночасно досягається максимальна ефективність, так як перемикавання полюсів при цьому відбувається в моменти максимальної близькості робочих полюсів для обраної комбінації. При використанні ж декількох полюсів одночасно вдається досягти більшого значення сили, але полюси перемикаються в моменти меншої ефективності.

Залежність k_{ef} від кількості полюсів для комбінації $n+1/n$ приведено на рис. 2. Як можна побачити, при збільшенні кількості полюсів коефіцієнт ефективності значно зростає і вже при $n=10$ досягає значення близького до 1. При використанні ж $[n/2]$ полюсів коефіцієнт ефективності падає з ростом кількості полюсів, що пояснюється зменшенням різниці в відстані між полюсом що прискорює й полюсом що гальмує. Варто відмітити, що при використанні $[n/2]$ полюсів одночасно, непарна кількість полюсів має більшу ефективність, через меншу відстань в моменти перемикавання.

З врахуванням коефіцієнту ефективності було визначено максимальні значення сили, які можуть бути досягнуті в заданих габаритах двигуна ДТА-1У (довжина $L=860$ мм, діаметр $D=520$ мм) рис.3.

При цьому, при збільшенні кількості полюсів і одночасному використанні одного полюса максимальне значення сили зменшується і обмежується величиною одного полюса. При використанні ж $[n/2]$ полюсів, максимальна сила, в більшій мірі обмежується коефіцієнтом ефективності.

На основі проведеного дослідження для структури $n+1/n$ було розроблено й розраховано ВІД з $n=7$ при одночасній роботі трьох полюсів для розміщення в корпусі двигуна ДТА-1У. Як матеріал магнітопроводу використовувався «Альсифер» через високу індукцію насичення й хороші частотні характеристики. У результаті розрахунку, вдалося досягти зменшення об'єму у 2,75 разів і збільшенню потужності в 6 разів. Тобто, розроблений двигун, при

габаритах ($L=313$ мм, $D=520$ мм) забезпечує момент $M=1150$ Н/м і має максимальну частоту обертання $n=9375$ об/хв. При цьому, втрати на перемагнічення магнітопроводу, при максимальній частоті роботи складають 8%.

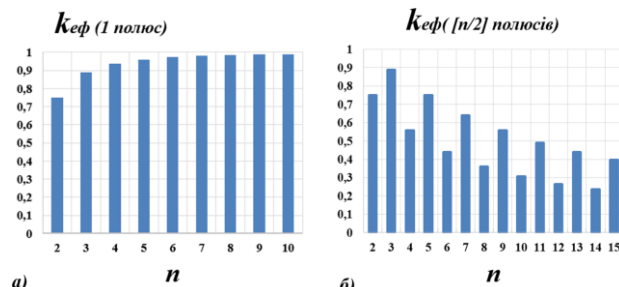


Рис.2 – Залежність ефективності конфігурації від кількості полюсів: а) при роботі 1 полюса; б) при роботі $[n/2]$ полюсів

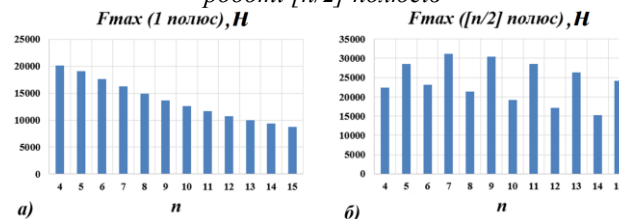


Рис.3 – Залежність максимальної сили від кількості полюсів при використанні одночасно: а) одного полюса; б) $[n/2]$ полюсів;

Принцип ефективного контролю ВІД

Найпростішим методом контролю ВІД є генерування струму обмоток прямокутної форми, що призводить до значних пульсацій обертового моменту. Більш складні методи, наприклад пряме управління обертовим моментом [9], функція розподілу обертового моменту [10], зменшують пульсації обертового моменту, але призводять до накладання струму різних фаз, що знижує ефективність ВІД, рис.4.

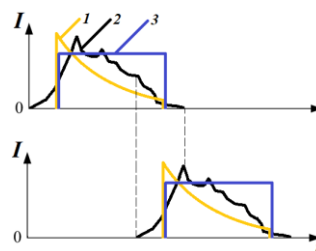


Рис. 4 – Форма струму обмотки: 1 - запропонована форма струму; 2 – прямий контроль моменту; 3 – прямокутна форма струму

Запропонований алгоритм управління дозволяє одночасно забезпечити постійний обертовий момент і усунути накладання струму в обмотках полюсів статора ВІД.

При цьому, для ефективної роботи ВІД, генерувати струм потрібно в тих обмотках статора, до яких полюс ротора, що забезпечує рух у позитивному

напрямку, найближче. При цьому, сумарний струм обмотки статора I_{Σ} повинен мати таку форму, щоб для будь-якої координати полюса ротора створювалась постійна загальна сила $F_{\Sigma} = \text{const}$. Для забезпечення цієї умови загальний струм обмотки зменшується, коли полюс ротора наближається до полюса статора в напрямку руху, як на рис.4(1).

Як наслідок, проблема формування струму обмотки потребує відповідної структури перетворювача з такими вимогами: регульована форма вихідного струму; можливість формування крутого фронту; висока ефективність.

Методика формування струму обмотки

Зазвичай ВІД живиться асиметричними напівмостовими перетворювачами [11]. Також для більш ефективного використання комутаторів використовуються спільні топології [12, 13]. Для підвищення ефективності застосовують м'яку комутацію та повномостові перетворювачі з синхронним випрямленням струму [14].

Більш привабливе рішення, особливо для високих потужностей, може бути реалізовано в модульному ВІД, що складається з рівної кількості секцій ротора та статора.

Припустимо, ВІД має дві секції. Загальна сила F_{Σ} - сума сил секцій $F_{\Sigma 1}$ і $F_{\Sigma 2}$:

$$F_{\Sigma} = F_{\Sigma 1} + F_{\Sigma 2}. \quad (6)$$

Відповідно до формули (2) сила F пропорційна квадрату струму I , $F \sim I^2$. Отже, якщо визначити струм секцій статора I_{SW1} та I_{SW2} наступним чином:

$$I_{SW1}(t) = I_{\Sigma}(t) \cos(\omega t); \quad (7)$$

$$I_{SW2}(t) = I_{\Sigma}(t) \sin(\omega t). \quad (8)$$

Тоді сумарна сила F_{Σ} пропорційна:

$$F_{\Sigma} \sim I_{SW1}(t)^2 + I_{SW2}(t)^2 = I_{\Sigma}(t)^2, \quad (9)$$

і тому не має пульсації, як показано на Рис.5.

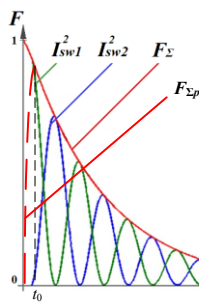


Рис. 5 – Сумарна сила F_{Σ} як сума сил двох секцій

Регулювання амплітуди струму за гармонічним законом у широкому діапазоні, як показано у формулах (7) та (8), потребує більш складних рішень, наприклад двоступеневих перетворювачів [15]. Доцільніше регулювати магнітний потік додатковою обмоткою статора та більш ефективними

одноступеневими перетворювачами. У цьому випадку загальний магнітний потік $\Phi_{SW(i)}$ утворюється двома струмами обмотки $I_{SW(i)1}$ та $I_{SW(i)2}$.

Якщо струм $I_{SW(i)1}$ дорівнює $I_{SW(i)1} = A \sin(\omega t)$, а струм $I_{SW(i)2}$ має однакову амплітуду A і зміщений на кут φ , $I_{SW(i)2} = A \sin(\omega t + \varphi)$ загальний потік секції $\Phi_{SW(i)}$ обчислюється таким чином:

$$\begin{aligned} \Phi_{SW(i)}(t) &\sim 2A \sin(\omega t + \varphi / 2) \cos(\varphi / 2) = \\ &= A^* \sin(\omega t + \varphi / 2). \end{aligned} \quad (10)$$

Отже, змінюючи зсув фаз між обмотками секції можна регулювати амплітуду A^* в діапазоні $[0; 2A]$.

Слід зауважити, що на практиці неможливо досягти ідеально різкого піку струму обмотки статора через її індуктивний характер, що призводить до виникнення похибки формування струму t_0 , яка може бути знижена шляхом збільшення частоти формування струму.

Одним із можливих рішень усунення похибки є компенсація сумарної сили в момент $[0; t_0]$ силою попереднього полюса. Це можливо зробити, коли діючий полюс статора вимикається до того, як вирівнявся з робочим полюсом ротора. І, так як струм індуктивності розімкнутого полюса не може спасти миттєво, розімкнутий полюс буде забезпечувати значення сили, яке компенсує провал сили наступного полюса.

Запропонований метод регулювання має такі переваги:

- можливість створення різко наростаючого фронту загальної сили, що визначається кутовою частотою струмів обмотки секції ω , формулами (7) та (8);
- підвищити ефективність приводу двигуна за рахунок м'якого перемикавання транзисторів на інтервалах перетину нуля.

Топологія перетворювача

В якості основної топології для формування квазі-гармонічної форми струму, наведеної у формулах (7) та (8), може бути використаний резонансний мостовий перетворювач [16], показаний на рис. 6.

Резонансний контур перетворювача складається з резонансного конденсатора C і змінної індуктивності обмотки статора ВІД L . Транзистори при цьому перемикаються при нульовому струмі.

Електропривод для одного полюса статора при мінімальній конфігурації з двома секціями складається з чотирьох подібних резонансних перетворювачів, як показано на рис. 7.

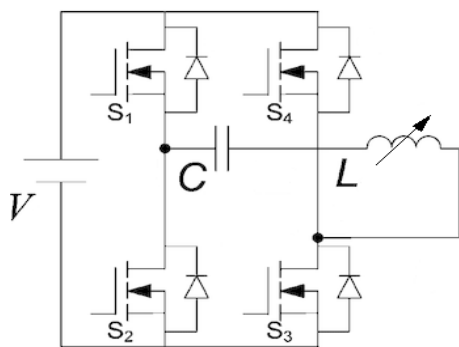


Рис. 6 – Резонансний мостовий перетворювач

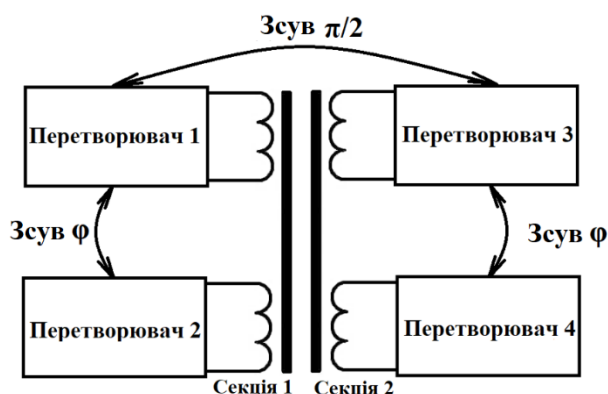


Рис. 7 – Драйвер одного полюса статора

Така модульна структура приводу додатково розподіляє потужність між перетворювачами [17, 18].

Як було сказано вище, полюси статора працюють один за одним, тому може використовуватися лише один електропривод статора для всього ВІД. При цьому електропривод підключається до кожного полюса статора за допомогою двонаправлених ключів.

Симуляція роботи електроприводу

Моделювання роботи електричного драйвера здійснено в системі моделювання R2013a - MATLAB & Simulink. Схема одного перетворювача зображена на рис.8. Індуктивність змінюється в межах $L = 63,4^{-3} \dots 11,7^{-3} \text{ Гн}$, $C = 512 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

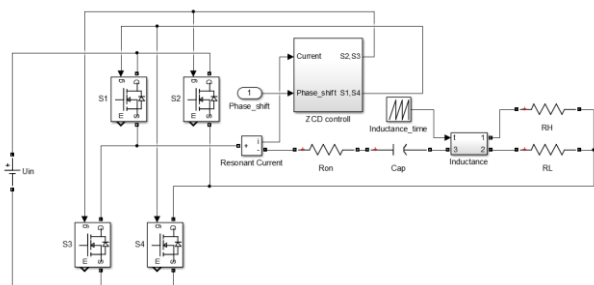


Рис. 8 – Схема одного перетворювача в Simulink

На рис. 9 зображено нормовану сумарну силу при різних кількості періодів синусоїди для формування заданої сили. З рисунку видно, що

амплітуда струму секцій змінюється відповідно до закону регулювання струму, описаного раніше. Оскільки зсув фаз між обмотками секції для модуляції амплітуди формується шляхом введення затримки при перемиканні ключів в моменти нульового струму, форма струму спотворюється і виникають пульсацій моменту, що негативно впливають на роботу двигуна. Ці пульсації можуть бути зменшені, шляхом збільшення кількості періодів формування струму обмотки одного полюса.

На рис. 9 зображено нормовану сумарну силу двигуна, як суму квадратів струму обмоток. Як можна побачити, при кількості періодів на формування струму $T=20$ пульсації мають значення близько 6,5%.

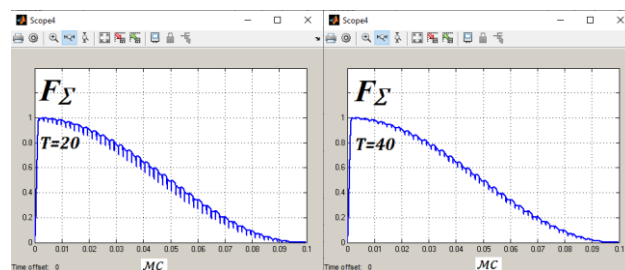


Рис. 9 – Нормована сумарна сила

При використанні кількості періодів $T=40$ пульсації зменшуються в два рази і складають близько 3,25%.

Висновки

Оптимальною конфігурацією для даної структури двигуна є $n+1/n$, так як вона забезпечує оптимальне розміщення полюсів в корпусі ротора, що дозволяє досягти більшого значення сили в заданих габаритах.

Для заданої структури було розроблено і розраховано ВІД, об'єм якого в 2,75 разів менший, а потужність в 6 разів більша у порівнянні з асинхронним двигуном ДТА-1У.

За рахунок використання запропонованого алгоритму керування для формування струму заданої форми пульсації обертового моменту мінімізовано.

Запропоновано модульну структуру електричного драйвера, яка дозволяє розподілити потужність між секціями полюса і використовувати лише чотири перетворювачі для всього ВІД.

Список літератури

1. Boukoberine M. N., Zhou Z., Benbouzid M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. *Applied Energy*. 2019. V. 255. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113823.
2. Laskaris K. I., Kladas A. G. Internal Permanent Magnet Motor Design for Electric Vehicle Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. V. 57(1). P. 138–145. doi:10.1109/tie.2009.2033086.
3. Widmer J. D., Martin R., Kimiabeigi M. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable*

- Materials and Technologies*. 2015. V. 3. P. 7–13. doi:10.1016/j.susmat.2015.02.001.
4. Ramu Krishnan. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press, 2010. 611 p. doi: 10.1201/9781420014235.
 5. Chiba A., Kiyota K. Review of research and development of switched reluctance motor for hybrid electrical vehicle. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. 2015. P. 127–131. doi:10.1109/wemdc.2015.7194520.
 6. Jiang C., Chau K. T., Liu C., Han W. Design and Analysis of Wireless Switched Reluctance Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. V. 1–1. doi:10.1109/tie.2018.2829684.
 7. Yu Q., Bilgin B., Emadi A. Design considerations of switched reluctance machines with high power density. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. 2016. doi:10.1109/itec.2016.7520226.
 8. Карий М. О., Павлюченко В. Л., Жуйков В. Я., Вербицкий С. В., Ямненко Ю. С. *Електропривод з вентильно-індукторним електроприводом*. Опис до патенту на корисну модель Україна UA 127633 U, 2018.
 9. Deng X., Mecrow B., Gadoue S., Martin R. A torque ripple minimization method for six-phase switched reluctance motor drives, *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2016. doi: 10.1109/icelmach.2016.7732641.
 10. Xue X. D., Cheng K. W. E., Ho S. L. Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009, V. 24(9). P. 2076–2090. doi:10.1109/tpel.2009.2019581.
 11. Liaw C.-M., Hu K.-W., Wang J.-C., Ho C. Y., Development and Operation Control of a Switched-Reluctance Motor Driven Flywheel. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. V. 1–1. doi:10.1109/tpel.2018.2814790.
 12. Deng X., Mecrow B. Design and comparative evaluation of converter topologies for six-phase switched reluctance motor drives. *The Journal of Engineering*. 2019. V. (17), P. 4017–4021. doi:10.1049/joe.2018.8031.
 13. Hu Y., Wang T., Ding W. Performance evaluation on a novel power converter with minimum number of switches for a six-phase switched reluctance motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. V. 1–1. doi:10.1109/tie.2018.2840480.
 14. Ellabban O., Abu-Rub H. Switched reluctance motor converter topologies: A review. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2014. P. 840–846. doi:10.1109/icit.2014.6895009.
 15. Liu H., Loh, P. C., Wang X., Yang Y., Wang W. & Xu D. Droop Control With Improved Disturbance Adaption for a PV System With Two Power Conversion Stages. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. V. 63(10). P. 6073–6085. doi:10.1109/tie.2016.2580525.
 16. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit. *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2016. P. 327–332. doi:10.1109/elnano.2016.7493078.
 17. Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding. *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga. 2017. P. 1–6. doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.
 18. Galkin I., Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D. Modular Self-Balancing Battery Charger Concept for Cost-Effective Power-Assist Wheelchairs, *Energies*. 2019. V. 12. 1526. doi: 10.3390/en12081526.

References (transliterated)

1. Boukoberine M. N., Zhou Z., Benbouzid M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects, *Applied Energy*, 2019, V. 255, doi:10.1016/j.apenergy.2019.113823.
2. Laskaris K. I., Kladas A. G. Internal Permanent Magnet Motor Design for Electric Vehicle Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, V. 57(1), p. 138–145, doi:10.1109/tie.2009.2033086.
3. Widmer J. D., Martin R., Kimiabeigi, M. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets, *Sustainable Materials and Technologies*, 2015, 3, p. 7–13, doi:10.1016/j.susmat.2015.02.001.
4. Ramu Krishnan. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, 2010. 611 p., doi: 10.1201/9781420014235.
5. Chiba A. & Kiyota K. Review of research and development of switched reluctance motor for hybrid electrical vehicle, *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2015, p. 127–131, doi:10.1109/wemdc.2015.7194520.
6. Jiang C., Chau K. T., Liu C. & Han W. Design and Analysis of Wireless Switched Reluctance Motor Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, V. 1–1, doi:10.1109/tie.2018.2829684.
7. Yu Q., Bilgin B., Emadi A. Design considerations of switched reluctance machines with high power density, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2016, doi:10.1109/itec.2016.7520226.
8. Kari M. O., Pavliuchenko V. L., Zhuikov V. Y., Verbytskyi Y. V., Yamnenko Y. S. *Електропривод з вентильно-індукторним електроприводом*, [Electric drive with switched-reluctance motor], Опис до патенту на корисну модель України] Description of the utility model patent Ukraine] UA 127633 U, 2018.
9. Deng X., Mecrow B., Gadoue S. & Martin R. A torque ripple minimization method for six-phase switched reluctance motor drives, *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, doi:10.1109/icelmach.2016.7732641.
10. Xue X. D., Cheng K. W. E., Ho S. L. Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, V. 24(9), p. 2076–2090, doi:10.1109/tpel.2009.2019581.
11. Liaw C.-M., Hu K.-W., Wang J.-C. & Ho C. Y., Development and Operation Control of a Switched-Reluctance Motor Driven Flywheel, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, V. 1–1, doi: 10.1109/tpel.2018.2814790.
12. Deng X., Mecrow B. Design and comparative evaluation of converter topologies for six-phase switched reluctance motor drives, *The Journal of Engineering*, 2019 (17), p. 4017–4021, doi:10.1049/joe.2018.8031.
13. Hu Y., Wang T., Ding W. Performance evaluation on a novel power converter with minimum number of switches for a six-phase switched reluctance motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, V. 1–1, doi:10.1109/tie.2018.2840480.

14. Ellabban O. & Abu-Rub H. Switched reluctance motor converter topologies: A review. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2014, p. 840-846, doi:10.1109/icit.2014.6895009.
15. Liu H., Loh, P. C., Wang X., Yang Y., Wang W. & Xu D. Droop Control With Improved Disturbance Adaption for a PV System With Two Power Conversion Stages, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10), p. 6073–6085, doi:10.1109/tie.2016.2580525.
16. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O. & Prokhorova A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit, *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2016, p. 327–332. doi:10.1109/elnano.2016.7493078.
17. Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding, *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, 2017, p. 1–6, doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.
18. Galkin I., Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D. Modular Self-Balancing Battery Charger Concept for Cost-Effective Power-Assist Wheelchairs, *Energies* 2019, V. 12, iss. 1526, doi: 10.3390/en12081526.

Сведения об авторах (About authors)

Лук'янов Микола Олексійович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент кафедри електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-8930-9992; e-mail: zebrahead097@gmail.com

Mykola Lukianov – Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8930-9992; e-mail: zebrahead097@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лук'янов М. О. Вентильно-індукторний двигун з покращеними тяговими характеристиками. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 3–. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.03.

Please cite this article as:

Lukianov M. Switched-reluctance motor with improved traction characteristics. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2020, no. 2 (4), pp. 3–, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лукьянов Н. А. Вентильно-индукторный двигатель с улучшенными тяговыми характеристиками. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 3–. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.03.

АННОТАЦІЯ Вентильно-індукторний двигателю завдяки своїм перевагам може використовуватися в транспортних засобах низької та середньої потужності. Однак, через значительні пульсації крутячого моменту, складності електричного драйвера та недостатньої удельної потужності він не є розповсюдженим. В даній статті розглядається структура та характеристики вентильно-індукторного двигателя з С-образними полюсами та електричний драйвер для його контролю для мінімізації недоліків двигателя. В результаті аналізу, запропоновані критерії ефективності, оснований на порівнянні прискорюючої та гальмівної сили, створюваної полюсом статора. Для забезпечення ефективної роботи двигателя гальмівна сила повинна бути мінімальною, а її вплив компенсовано певною формою струму, за рахунок чого сумарна сила та момент залишаються постійними в кожен момент часу. За рахунок вибору оптимального відношення між полюсами статора та ротора забезпечується мінімальне значення гальмівної сили, а вибір оптимальної кількості полюсів дозволяє досягти максимальної сили. За рахунок високочастотного методу формування струму обмотки статора з запропонованою формою, вплив гальмівної сили і, відповідно, пульсації крутячого моменту мінімізовано. При цьому для підвищення ефективності роботи двигателя запропоновано двохсекційну структуру полюсів з використанням додаткових обмоток модуляції амплітуди струму, що додатково дозволяє розподілити потужність між секціями. Формування струму управління обмотками здійснюється розповсюдженим резонансним перетворювачем з м'яким переключенням ключів. Модульна структура електричного драйвера дозволяє використовувати всього чотири резонансні перетворювачі для всього драйвера при одночасній роботі одного полюса статора. В результаті було виявлено, що оптимальною структурою двигателя є $n + 1/n$, так як розміщення полюсів в корпусі ротора дозволяє досягти максимальної сили. Розрахунок вентильно-індукторного двигателя для даної структури з $n=7$ показав зменшення об'єму двигателя в 2,75 рази та підвищення потужності в 6 рази за порівнянням з популярним тяговим асинхронним двигателем. Моделювання електричного драйвера в середовищі Matlab Simulink показало, що пульсації крутячого моменту при даному методі формування струму обмотки статора становлять близько 3,25% і можуть варіюватися в залежності від кількості періодів модулюючого сигналу.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигателю; модульний електричний драйвер; постійний момент; високочастотне управління; резонансний перетворювач

Надійшла (received) 04.05.2020